

23. Клейн В. И., Майзель Г. М., Ярошенко Ю. Г., Авдеенко А. А. Теплотехнические методы анализа агломерационного процесса / под ред. Ю.Г. Ярошенко – Екатеринбург: УГТУ–УПИ, 2004. – 224 с.
24. Коротич В. И., Фролов Ю. А., Каплун Л. И. Агломерация: учебное пособие – Екатеринбург: УГТУ–УПИ, 2005. – 416 с.
25. Фролов Ю. А., Полоцкий Л. И., Кобелев В. А., Конопляник В. В. Трехмерная динамическая модель процесса агломерации // Бюллетень ЦНИИЧМ. –2005. – № 11. – С. 154–162.
26. Новак С. Б., Гармаш Н. И., Мартыненко В. А., Мартыненко А. В. Теория и практика управления агломерационным процессом. Кривой Рог. ООО «Этюд-Сервис» 2006. – 340 с.
27. Фролов Ю. А., Конопляник В. В., Исаенко Г. Е. [и др.]. Анализ процессов сушки, конденсации и газодинамики слоя в начальном периоде агломерации // Сталь. 2008. № 6. С. 5–13.
28. Теплотехника процессов агломерации / под ред. Б. А. Боковикова. Екатеринбург: ООО «УИПЦ», 2013. 267 с. / В. И. Клейн, Б. А. Боковиков, С. Н. Евстюгин, А. А. Кутузов, И. С. Берсенева.

УДК 669-5

В. Ю. Поволоцкий, Б. А. Боковиков, В. А. Горбачев,

Ю. В. Ланцов, С. Ю. Плотникова

ООО «Научно–производственное внедренческое предприятие ТОРЭКС»,

г. Екатеринбург, Россия,

ОАО «ОЭМК», г. Старый Оскол, Россия

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ПРОЦЕССА МЕТАЛЛИЗАЦИИ ОКАТЫШЕЙ ДЛЯ УСТАНОВОК ПРЯМОГО ПОЛУЧЕНИЯ ЖЕЛЕЗА

Аннотация

Разработан программный комплекс балансовой модели для установок прямого получения железа («АРМ Технолога») и кинетико-динамической модели процесса металлизации окатышей в шахтной печи. Этот комплекс предназначен для анализа и прогнозов УМ, а также для оптимизации параметров и управления работой ШП в качестве «Советчика мастера».

Ключевые слова: шахтная печь; установка металлизации; прямое получение железа, программный комплекс.

Abstract

The program suite of balance model has been developed towards DRI machines (“Automated workstation of process engineer”) along with kinetic-and-dynamic model of pellet metallization process in the shaft furnace. This suite is meant to be used for analysis and evaluation procedure of metallization machine as well as for optimization of the parameters and operation control of shaft furnace. Furthermore that suite shall be principally used as wizard.

© Поволоцкий В. Ю., Боковиков Б. А., Горбачев В. А., Ланцов Ю. В., Плотникова С. Ю., 2014

The key terms used: shaft furnace; metallization machine; direct reduction of iron (DRI); program suite.

В конце прошлого века при разработке отечественной технологии металлизации железорудных окатышей в шахтной печи (ШП) и для проектирования промышленных установок прямого получения железа (ППЖ) впервые были созданы математические модели для кинетико-динамических и балансовых расчетов ППЖ [1–3]. В дальнейшем проводили их адаптацию, в частности, для условий усовершенствования технологии и тепловых режимов действующих установок металлизации (УМ) ОАО «ОЭМК». Ниже приведено краткое описание этих моделей.

Около 20 лет назад по заказу ОАО «ОЭМК» был разработан программный комплекс «АРМ Технолога» для сбора производственных и технологических данных УМ и выполнения необходимых теплотехнических расчетов [1]. При этом проводился анализ работы УМ, установление соотношений между технико-экономическими показателями, качеством сырья, металлизированного продукта и их технологическими параметрами. На основании полученных результатов методами математической статистики формировались отчеты по работе всех УМ комбината.

Программный комплекс позволял сделать выборку из любых накопленных данных за нужный период (от нескольких часов до нескольких лет), сформировать необходимые данные в виде суточных, недельных, месячных и за произвольный период отчетов по значениям технологических параметров, качеству исходных окатышей и металлизированного продукта, распределения продукта по бункерам и другим местам хранения, по качеству природного газа и т. д. Этот программный комплекс (начиная с 1995 года и до с.г.) постоянно использовали в повседневной работе комбината для отслеживания динамики всех параметров и показателей УМ, подготовки исходных данных для регулярных отчетов (по материальному и тепловому балансам), выполнения проектов реконструкции установок, оценки эффективности внедренных технических мероприятий, а также для разработки методик норм расхода природного газа и электроэнергии. Многолетней практикой была доказана необходимость и важность данного комплекса в работе УМ.

Предложенная методика отличается от других разработок (в частности «Superdata» или «Simрах» фирмами Мидрекс и Сименс) улучшенной структурой с элементами экспертной системы и блоком учета теплотерь, позволяющими на основании частично достоверных исходных данных путем их адаптации получать вполне надежный сбалансированный результат. При этом процедура адаптации выполняется с участием эксперта, обладающего положительным технологическим опытом и знающего особенности производства.

Результатами расчета с помощью разработанного ПК являются скорректированные параметры материальных потоков, комплексные показатели шахтной печи и реформера, а также сведенный с заданной погрешностью их материальный и энергетический балансы.

В расчете учтены наиболее характерные для технологии металлизации физико-химические превращения, протекающие при взаимодействии между газом и шихтой, при сжигании и/или реформировании топлива:

- нагрев, восстановление, науглероживание и охлаждение окатышей (включая пылевывнос);
- газификация кислорода, углерода и влаги шихты;

- испарение и конденсация влаги;
- пиролиз, конверсия (или образование) углеводородов;
- окисление горючих компонентов топлива при избытке воздуха;
- теплопередача через стенки аппаратов и газовых трактов УМ в окружающую среду.

Для повышения точности расчета в модель включены температурные зависимости теплофизических характеристик газов и шихты, зависимость состава газов от параметров состояния при термодинамическом равновесии и условиях влагонасыщения, а также экспериментальные данные о тепловых потерях, полученные в зимний и летний периоды работы установок металлизации. В качестве исходных параметров используются данные информационной базы, куда заносятся сведения из суточных рапортов о работе модулей УМ.

Для прогнозирования различных режимов работы УМ и управления процессом прямого получения железа в балансовых расчетах «АРМ Технолога» дополнительно используют кинетико-динамическую модель (тепломассообмен и газодинамика в слое [2; 3]), которая позволяет прогнозировать динамику реального процесса металлизации окатышей в объеме шахтной печи. Это расширяет поиск и расчетную отработку новых режимов работы УМ (включая газокислородную инъекцию, внутripечную конверсию и разложение углеводородов в слое губчатого железа [3]), чтобы увеличить производство и улучшить качество металлизированного продукта.

Кинетико-динамическая модель представляет собой математическое описание процесса металлизации железорудных материалов (руды, окатышей) и алгоритмы решения системы дифференциальных уравнений теплообмена и газодинамики, позволяющие имитировать в ячейках памяти компьютера все изменения параметров окатышей и восстановительного газа (массового расхода, температуры, давления и химического состава) в масштабе реального времени по высоте и на границах зон шахтной печи [2; 3].

Детерминированный метод расчета реализован в этой модели в виде программного комплекса, который может быть использован в компьютерах как инструмент исследователя или технолога для анализа, прогнозирования и управления процессом прямого получения железа (математическое описание этой модели дано в Приложении).

Подбирая параметры газопотоков (расход – температура – состав) на входе в зону восстановления, параметры окатышей (гранулометрический и химический составы) с учетом скорости схода шихты, технолог с помощью этой модели может оптимизировать режим работы ШП для увеличения производства, улучшения качества и снижения удельных энергозатрат установок металлизации (УМ).

В перспективе программный комплекс «АРМ Технолога» с базой данных (показания приборов пульта управления УМ) и «Кинетико-динамическая модель ШП» могут быть использованы как инструмент «Советчика мастера», для оптимизации параметров и управления процессом металлизации окатышей в шахтной печи.

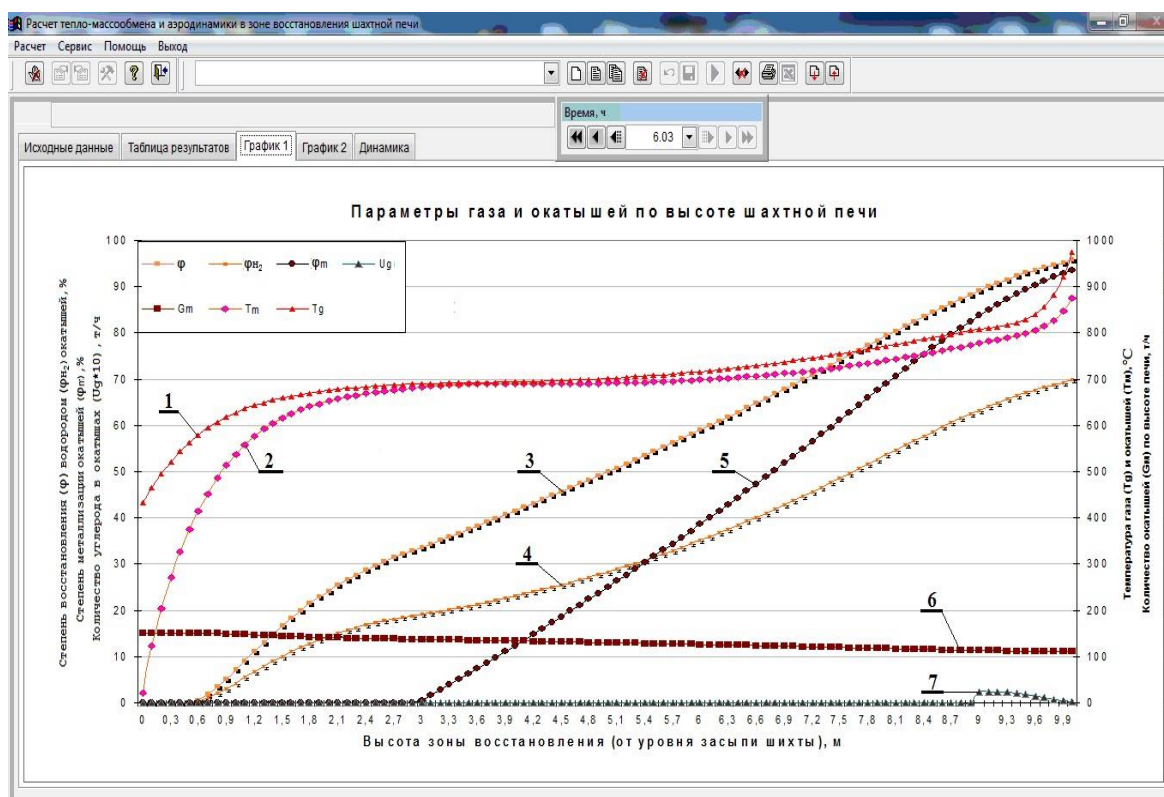
В качестве примера практического использования этих моделей показан график изменения параметров процесса восстановления в шахтной печи (рисунок) для анализа работы и последующей реконструкции УМ.

Как видно из представленного графика с данными (см. рисунок), полученными из примера расчетов детерминированной модели в комплексе с балансовой моделью «АРМ Технолога» [2], изменяя параметры восстановительного газа и скорости шихты – «рычагов управ-

ления», можно заметно поднять производство металлizedованного продукта и сократить энергoзатраты, обеспечив нужное качество губчатого железа.

Зaкoнчeниe

Разработана балансовая модель процесса прямого получения железа для установок металлизaции (УМ) окатышей в шахтной печи, включающая материально-энергетические балансы всех основных блоков технологии металлизaции (шахтная печь, реформер и др.), которая была положена в основу программного комплекса «АРМ Технолога» для анализа и оптимизации режимов работы УМ ОАО «ОЭМК». Полученные результаты теплотехнических расчетов были использованы в проектах реконструкции установок металлизaции и реализoваны на практике.



Распределение параметров процесса металлизaции окатышей по высоте шахтной печи: 1 – температура газа (T_g), °C;

- 2 – температура окатышей (T_m), °C; 3 – степень восстановления (ϕ), %;
 4 – степень восстановления водородом (ϕ_{H_2}), %; 5 – степень металлизaции окатышей (ϕ_m), %; 6 – количество окатышей (G_m), т/ч;
 7 – добавка углерода в окатышах, (U_g), т/ч

Для выполнения прогнозов работы УМ и управления режимами прямого получения железа вместе с программным комплексом «АРМ Технолога» дополнительно используют кинетико-динамическую модель (теплообмен и газодинамика в слое), имитирующую динамику реального процесса металлизaции окатышей в шахтной печи. Это расширяет воз-

возможности расчета новых режимов работы УМ с целью увеличения производства, сокращения энергетических затрат и улучшения качества губчатого железа.

Список использованных источников

1. Поволоцкий В. Ю., Ланцов Ю. В., Плотникова С. Ю. Анализ и совершенствование работы установок металлизации на базе модели «АРМ технолога» // Сталь. 2011. № 7. С. 16–19.
2. Ровнушкин В. А., Боковиков Б. А., Братчиков С. Г. и др. Бескоксовая переработка титаномагнетитовых руд. – М.: Metallurgy, 1988. 247 с.
3. Поволоцкий В. Ю., Боковиков Б. А., Петров С. В. и др. Кинетико-динамическая модель шахтной печи для получения губчатого железа. – Сб. докладов межд. научно-практ. конф. (18–21 сентября 2012 г.). Екатеринбург: УрФУ, 2012. С. 132–136.

Приложение

КИНЕТИКО-ДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА МЕТАЛЛИЗАЦИИ ЖЕЛЕЗОРУДНЫХ ОКАТЫШЕЙ В ШАХТНОЙ ПЕЧИ

1. Постановка задачи

Шахтный реактор с плотным движущимся слоем железорудных материалов продувается потоком технологического газа. Шахта реактора переменного по высоте сечения имеет одну или несколько зон обработки шихты газом с рядом границ, определяемых местом подачи в слой газа (рис. П. 1). Индексация переменных модели соответствует обозначениям границ на указанном рисунке.

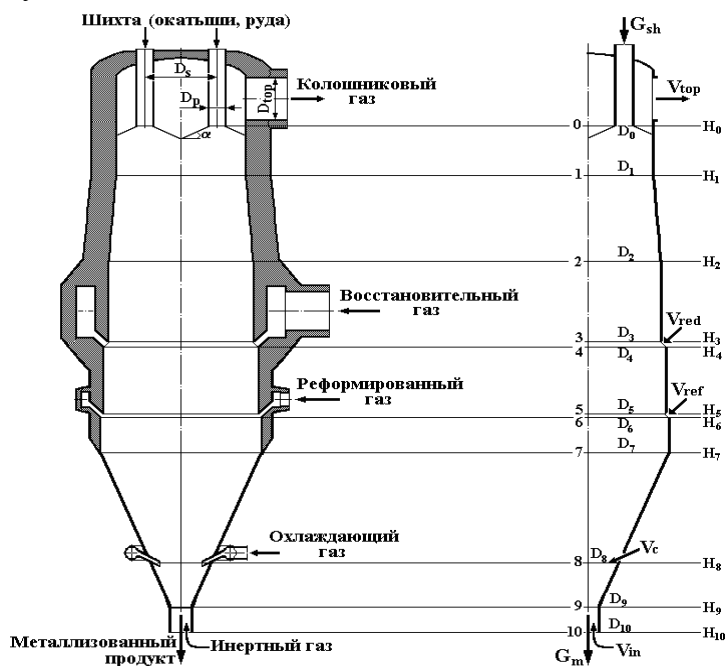


Рис. П. 1. Схема материальных потоков и профиль шахтной печи

Железорудная шихта (окатыши и/или руда) известного физико-химического S_m и granulometric $Gi(f, \delta)$ состава поступает в реактор через загрузочные трубы с температу-

рой T_{sh} . Металлизированный продукт выгружается из печи с массовой скоростью Gm , определяющей расход загружаемой шихты Gsh и скорость ее опускания в реакторе.

Технологический газ подается в реактор (через фурмы или отверстия в кладке печи) на заданной границе I_z (двух или нескольких) в количестве $V(I_z)$ с температурой $T(I_z)$, давлением $P(I_z)$ и химическим составом $S(I_z)$.

Требуется, в соответствии с заданными краевыми условиями и профилем печи, определить распределение параметров газа и шихты по высоте (h) шахтного реактора во времени (τ).

Для этого необходимо сформулировать и решить сопряженную краевую задачу тепло-массообмена и газодинамики, в которой могут быть использованы уравнения нашей одномерной модели шахтной печи, приведенные ниже.

2. Математическая формулировка задачи

2.1. Тепло- и массообмен

Рассмотрим задачу нестационарного тепло- и массообмена в шахтной печи, где динамика процесса обусловлена опусканием слоя шихтовых материалов (с переменной по высоте скоростью, согласно профилю печи). Соответственно левая часть уравнений для любой из переменных материала (например, степени восстановления φ) есть полная производная этой переменной:

$$\frac{d\varphi}{d\tau} = \frac{\partial\varphi}{\partial\tau} + \frac{w_m}{H} \frac{\partial\varphi}{\partial x},$$

где w_m – скорость опускания слоя, м/ч; H , x – полная высота слоя (м) и относительная координата высоты (доли ед.), τ – время процесса (ч).

В аналогичных уравнениях для переменных газа производная по времени исчезает, благодаря принятому допущению о бесконечно большой (по отношению к скорости материала) скорости газа в слое.

Описание данной задачи удобнее представить в виде двух взаимосвязанных групп дифференциальных уравнений, объединенных по их принадлежности к соответствующим материальным потокам шахтной печи.

Уравнения потока материала (в обобщенном виде)

$$\frac{dTm}{d\tau} = \frac{w_m}{mH} \frac{dTg}{dx} + q_m \dots \dots \dots (1);$$

$$\frac{d\varphi_{CO}}{d\tau} = n \frac{dCO}{dx} \frac{w_m}{H} \dots \dots \dots (2);$$

$$\frac{d\varphi_{H_2}}{d\tau} = n \frac{dH_2}{dx} \frac{w_m}{H} \dots \dots \dots (3);$$

$$\frac{d\varphi}{d\tau} = n \left(\frac{dCO}{dx} + \frac{dH_2}{dx} \right) \frac{w_m}{H} \dots \dots \dots (4).$$

Уравнения потоков газа

$$\frac{dT_g}{dx} = Y_T (T_g - T_m) + Y_{TP} (T_g - T_o) + q_g \dots\dots\dots (5);$$

$$\frac{dV_{CO}}{dx} = Y_{CO} (CO - \bar{k}_{CO} CO_2) - Y_C (CO^2 - \bar{k}_C CO_2) \dots\dots\dots (6);$$

$$\frac{dV_{H_2}}{dx} = Y_{H_2} (H_2 - \bar{k}_{H_2} H_2 O) \dots\dots\dots (7);$$

$$\frac{dV_{H_2O}}{dx} = Y_{H_2O} \left[CO \left(\frac{H_2}{H_2O} \right)^{-L} - \bar{k}_{H_2O} CO_2 \left(\frac{H_2}{H_2O} \right)^L \right] \dots\dots\dots (8);$$

$$\frac{dV_{CH_4}}{dx} = Y_{CH_4} (CH_4 * H_2O - \bar{k}_{CH_4} * CO * H_2^3) \dots\dots\dots (9);$$

$$\frac{dV_{\Sigma}}{dx} = \frac{dV_{CO}}{dx} + \frac{dV_{H_2}}{dx} + \frac{dV_{CO_2}}{dx} + \frac{dV_{H_2O}}{dx} + \frac{dV_{CH_4}}{dx} \dots\dots\dots (10);$$

$$\frac{dP}{dx} = \xi \frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon^3} * \frac{w_g^2 \rho_g H}{d} 10^6 \dots\dots\dots (11).$$

Решение указанной задачи ведется методом численного интегрирования в направлении движения потоков с последовательным переходом от шихты к газу и обратно до выхода к квазистационарному состоянию процесса.

В дальнейшем, с развитием технологии металлизации, формулировку этой задачи планируется усовершенствовать и уравнения соответственно могут быть частично изменены.

2.2. Газодинамика

При формулировке задачи необходимо учесть влияние на характер движения газопотоков сил инерции и вязкости, зависимость теплофизических свойств газа от параметров состояния.

Желательно также по возможности учесть частичное перемешивание газопотоков на границе их раздела.

При решении сопряженной задачи, вероятно, можно пренебречь радиальной теплопроводностью слоя шихты, учитывая только теплопередачу через ограждающий контур печи в пристенном потоке.

3. Условные обозначения

H, h – общая и текущая высота слоя в шахтном реакторе, м;

I_z – заданные координаты профиля реактора (и точек ввода в слой газа);

\bar{K} – равновесное соотношение компонентов химических реакций;

L – опытный коэффициент, б/р;

m – соотношение теплоемкостей потоков материала и газа, б/р;

n – соотношение массемкостей потоков материала и газа, б/р;

V – объемный расход (количество) газа, м³/ч;

$CO, H_2, CO_2, H_2O, CH_4, N_2$ – компоненты газовой смеси, доли ед.;

T – температура потока, °С;

q – приведенные тепловые эффекты химических реакций, °С;

w – скорость движения материального потока, м/ч;

x – относительная высота (координата расчета), доли ед.;

Y – скорость термохимических превращений (функция T, P и φ), м³/ч;

Y_T – коэффициент теплоотдачи в системе газ – материал шахтной печи, б/р;

Y_{TP} – коэффициент теплопередачи между газом и воздухом (через стенку печи), б/р;

τ – время процесса, ч;

ε – порозность слоя шихты, доли ед.;

ξ – коэффициент гидравлического сопротивления слоя, б/р;

φ – степень восстановления шихты, доли ед.;

ρ – плотность среды, кг/м³.

Индексация переменных:

o – относится к воздуху (окружающей среде);

g – относится к потоку газа;

m – относится к потоку шихтовых материалов;

$CO, H_2, CO_2, H_2O, CH_4, N_2, C$ – относятся к соответствующим элементам системы.